

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**KARAKTERIZACIJA
MATERIJALA LISTA KRUŽNE
PILE**

ZAVRŠNI RAD

**Alberto Grbac
0035170708**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**KARAKTERIZACIJA
MATERIJALA LISTA KRUŽNE
PILE**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:
Alberto Grbac

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mojim roditeljima, Teodori i Brunu koji su mi pomagali i bili oslonac kroz vrijeme provedeno na studiju.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. Veri Rede za njen predan rad i pomoć prilikom izrade ovog završnog rada.

Mojim prijateljima na trenucima opuštanja i zabave onda kada mi je to najviše trebalo, kao i na njihovoj neizmornoj podršci i potpori.

Zahvaljujem se Ani koja je bila uz mene u najtežim trenucima, shvaćala me, podržavala u mojim odlukama i pomagala mi.

Još jednom, veliko hvala svima!

Alberto Grbac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|-------------------------------------|------------------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | 8-09-2014 Prilog |
| Klasa: | 602-004/14-6/2 |
| Ur.broj: | 15-7703-14-333 |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

ALBERTO GRBAC

Mat. br.: 0035170708

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

KARAKTERIZACIJA MATERIJALA LISTA KRUŽNE PILE

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**MATERIALS CHARACTERIZATION OF THE CIRCULAR SAW
BLADE**

Opis zadatka:

U radu je potrebno napraviti karakterizaciju materijala lista kružne pile za skidanje gipsa s
ciljem pronalaženja uzroka njegovog preranog dotrajanja.

U tu svrhu potrebno je:

- odrediti kemijski sastav materijala lista kružne pile,
- pripremiti uzorke za mikrostrukturnu analizu,
- napraviti kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture,
- izmjeriti mikrotvrdoću i makrotvrdoću materijala.

Na temelju dobivenih rezultata donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

11. studenog 2013.

Zadatak zadala:

Rede

Prof. dr. sc. Vera Rede

Rok predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2014.

2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.

2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Predsjednik Povjerenstva:

ZK

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | I |
| POPIS TABLICA..... | I |
| SAŽETAK..... | II |
| SUMMARY | I |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA[1]..... | 2 |
| 2.1. Makroskopska metalografija..... | 2 |
| 2.2. Svjetlosno-mikroskopska metalografija..... | 2 |
| 2.3. Priprema uzoraka metala za metalografsku analizu..... | 2 |
| 2.4. Elektronska metalografija ^[4,5] | 4 |
| 3. ALATNI ČELICI[2]..... | 6 |
| 3.1. Visoko-legirani alatni čelici za hladni rad | 8 |
| 3.1.1. Martenzitni nehrđajući čelici | 9 |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO | 10 |
| 4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja | 10 |
| 4.2. Materijal za ispitivanje..... | 10 |
| 4.3. Kemijska analiza materijala | 10 |
| 4.4. Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu | 12 |
| 4.4.1. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture | 12 |
| 4.4.1.1. Izrezivanje..... | 12 |
| 4.4.1.2. Ulijevanje (kapsuliranje)..... | 13 |
| 4.4.1.3. Brušenje | 14 |
| 4.4.1.4. Poliranje | 15 |
| 4.4.1.5. Nagrizanje | 16 |
| 4.4.2. Analiza mikrostrukture | 16 |
| 4.4.2.1. Mikrostruktura u poliranom stanju | 17 |
| 4.4.2.2. Mikrostruktura u nagriženom stanju..... | 18 |

| | |
|--|----|
| 4.4.2.3. Mjerenje mikrotvrdoće..... | 20 |
| 4.5. GDOES analiza površinske prevlake | 22 |
| 5. ANALIZA REZULTATA | 23 |
| 5.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava..... | 23 |
| 5.2. Osvrt na rezultate analize mikrostrukture | 23 |
| 5.3. Osvrt na rezultate analize mikrotvrdoće | 23 |
| 5.4. Osvrt na rezultate GD-OES analize | 23 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 25 |
| LITERATURA..... | 26 |
| PRILOZI..... | 27 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Shematski prikaz metalografske pripreme i analize uzorka..... | 4 |
| Slika 2. Shematski prikaz podjele alatnih čelika..... | 7 |
| Slika 3. List kružne pile..... | 10 |
| Slika 4. Instrument Leco GDS 850A. | 11 |
| Slika 5. Prikaz postupka izrezivanja dijela uzorka pile..... | 12 |
| Slika 6. Prikaz uzoraka na preši prije kapsuliranja | 13 |
| Slika 7. Prikaz uređaja za kapsuliranje..... | 14 |
| Slika 8. Prikaz uređaja za poliranje..... | 15 |
| Slika 9. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51..... | 16 |
| Slika 10. Polirana površina uzorka u području zuba pile..... | 17 |
| Slika 11. Detaljniji prikaz bočnog presjeka vrha zuba u poliranom stanju..... | 17 |
| Slika 12. Prikaz poprečnog presjeka pile u reznom području | 18 |
| Slika 13 Prikaz poprečnog presjeka pile (udaljeno od reznog područja)..... | 18 |
| Slika 14. Prikaz mikrostukture u poprečnom presjeku nakon nagrizanja..... | 19 |
| Slika 15. Prikaz mikrostukture u reznom području nakon nagrizanja..... | 19 |
| Slika 16. Mikrotvrdomjer WILSON-WOLPERT TUKON 2100 B proizvođača INSTRON.. | 20 |
| Slika 17. Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala (HV 0,1)..... | 21 |
| Slika 18. Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala i površinskog sloja (HV 0,05)..... | 21 |
| Slika 19. Maseni udjeli željeza i kroma od površine do dubine od 4 µm..... | 22 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Rezultati kemijske analize..... | 11 |
| Tablica 2. Prikaz sastava <i>Adlerovog reagensa</i> ^[3] | 16 |
| Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće. | 22 |

SAŽETAK

Cilj ovoga rada je karakterizacija materijala koji se koriste za izradu lista kružne pile za skidanje gipsa u medicini. Rad se sastoji od literaturnog pregleda svojstava i sastava alatnih čelika te eksperimentalnog dijela.

Teoretski dio sadrži opis nehrđajućih alatnih čelika s naglaskom na martenzitne, koji imaju svoju primjenu u medicini kao kirurški instrumenti.

Eksperimentalni dio se sastoji od karakterizacije materijala lista kružne pile za skidanje gipsa s ciljem pronalaženja uzroka njegovog preranog dotrajanja. U tu svrhu određen je sastav materijala kružne pile, napravljena je kvantitativna i kvalitativna analiza strukture te je izmjerena mikrotvrdoća i makrotvrdoća materijala.

Nakon provedene analize obrađeni rezultati su sumirani te su postavljeni određeni zaključci o strukturi i tvrdoći lista kružne pile koja se upotrebljava u medicini za skidanje gipsa.

Ključne riječi: kružna pila, martenzitni nehrđajući čelici, mikrostruktura.

SUMMARY

The aim of this paper is to characterize the material used for making circular saw blade for removing of plaster in medicine. The work consists of literature review of properties and composition of tool steels and experimental part.

The theoretical part contains a description of stainless steel tools with a focus on martensitic which have their applications in medicine, as well as surgical instruments.

The experimental part consists of materials characterization of circular saw blade for removing plaster with a view to finding the cause of his premature wear. For this purpose, composition of the material of circular saws was given as well as quantitative, qualitative, micro-hardness and macro-hardness of the materials was measured and determined.

Following the analysis, processed results are summarized and conclusions are placed on the structure and hardness of the circular saw blade that is used in medicine to remove the plaster.

Key words: circular saw blade, martensitic stainless steel, microstructure.

1. UVOD

U ovome završnom radu provedena je karakterizacija materijala lista kružne pile koja se u medicini koristi kao alat za rezanje gipsa. Karakterizacija materijala je provedena laboratorijskim metodama u svrhu određivanja kemijskog sastava, mikrostrukture, te svojstava. Materijala.

U teorijskom dijelu rada opisan je pojam nehrđajućih alatnih čelika i njihova podjela prema području rada i dobivanja te opis alata načinjenih od nehrđajućih čelika.

U eksperimentalnom dijelu provedena je karakterizacija materijala kroz analizu kemijskog sastava, analizu mikrostrukture i određivanje mikrotvrdoće materijala alata.

2. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA[1]

Metalografija je znanost koja se bavi istraživanjem strukture metala i legura pomoću svjetlosnog i elektronskog mikroskopa. Makrostruktura je vidljiva golim okom ili uz malo povećanje, dok mikrostruktura zahtijeva pomoć mikroskopa uz minimalno povećanje od barem 25 puta. Pri analizi mikrostrukture određuju se: veličina kristalnog zrna, prisutne faze, kemijska homogenost i raspodjela faza, deformacije strukture nastale nakon plastične deformacije materijala, debljina i struktura površinskih prevlaka te određivanje pukotine i načina loma. Ovakva vrsta analize može dati podatke o stanju materijala, prethodnoj obradi i svojstvima.

2.1. Makroskopska metalografija

Makrostruktura je vidljiva golim okom ili uz malo povećanje kao što je spomenuto i ranije. Predmet makroskopske metalografije jesu makro-pojave koje potječu od dobivanja i prerade metala, kao što su nakupine troske, pore, pukotine, lunke, različite nakupine u materijalu, različiti lomovi itd.

2.2. Svjetlosno-mikroskopska metalografija

Zbog neprozirnosti metala i slitina ovakva istraživanja se provode uz pomoć svjetlosnog mikroskopa čija je osnova reflektirano svjetlo (metalurški mikroskop). Mehaničkim djelovanjem na materijal brušenjem i naknadnim poliranjem potrebno je pripremiti izbrusak ravne površine i visokog metalnog sjaja za ovakvu vrstu karakterizacije metala i legura.

Pomoću svjetlosnog mikroskopa mogu se postići povećanja do 1000 puta što omogućuje analizu faza koje nastaju prilikom skrućivanja i kao posljedice promjena u čvrstom stanju. Svjetlosnim mikroskopom moguće je uočiti greške mikrostrukture, kao što su malokutne i velikokutne granice kristala, granice faza, granice kristala dvojnika, mikro-poroznosti, fizikalne nečistoće itd.

2.3. Priprema uzoraka metala za metalografsku analizu

Uzorci metala se analiziraju pomoću svjetlosnog mikroskopa koji je konstruiran tako da koristi svjetlost koja pada na površinu uzorka te radi neprozirnosti metala i legura reflektira se natrag u mikroskop. Mikroskop povećava sliku površine metalnog uzorka uz pomoć sustava zrcala i leća. Zbog korištenja reflektiranog svjetla s površine metalnog uzorka, površina uzorka mora se prije mikroskopiranja temeljito pripremiti.

Priprema uzorka metala za metalografsku analizu se sastoji od:

- uzimanje (izrezivanje) reprezentativnog uzorka iz osnovnog materijala
- umetanja uzorka u polimernu smolu
- brušenja i poliranja površine uzorka
- odmašćivanje, ispiranje i sušenje površine uzorka
- nagrivanja površine uzorka
- ispiranja i sušenja površine uzorka

Mikrostruktura uzorka analizira se prvo u poliranom, a kasnije i u nagrivenom stanju. Na slici 1 shematski je prikazan tijek metalografske pripreme i analize uzorka.



Slika 1. Shematski prikaz metalografske pripreme i analize uzorka.

Rezanje uzorka za metalografsku analizu predstavlja izrezivanje uzorka iz osnovnog materijala koji je prikladan za poliranje ili mikroskopsko ispitivanje. Prilikom rezanja potrebno je izbjeći oštećenja uzrokovana pregrijavanjem ili stvaranje pukotina u blizini površine reza.

Brušenje se uklanjaju tragovi koji nastaju prilikom rezanja i čisti se površina dijela. Brušenje je moguće izvesti ručno ili automatski.

Poliranje daje finije obrađenu površinu nego postupak brušenja. Za poliranje se koriste slobodne abrazivne čestice na platnu suspendirane u lubrikantu te se mogu kotrljati i/ili klizati između platna i površine uzorka. Poliranje je kao i brušenje moguće vršiti ručno i automatski.

Nagrizanjem površine uzorka moguće je otkriti i ocrtati granice zrna i ostale mikrostrukturne značajke koje nisu uočljive na poliranoj površini. Postupak nagrivanja vrši se na nakon mjerenja mikro-tvrdoće i poroznosti metala. Postoji nekoliko različitih metoda nagrivanja od kojih je najčešće upotrebljavana metoda selektivnog kemijskog nagrivanja, uz nju postoje još i toplinsko, elektrolitsko, nagrivanje pomoću otopljene soli, nagrivanje pomoću iona, bojanje toplinom (Heat tinting), nagrivanje plazmom (Plasma etching), termokemijsko nagrivanje (Thermochemical etching), reljefno poliranje (Relief polishing).

2.4. Elektronska metalografija^[4,5]

Elektronski mikroskop primjenjuje se u metalografiji kada se pojedini elementi mikrostrukture ne mogu dalje razlučiti pomoću svjetlosnog mikroskopa.

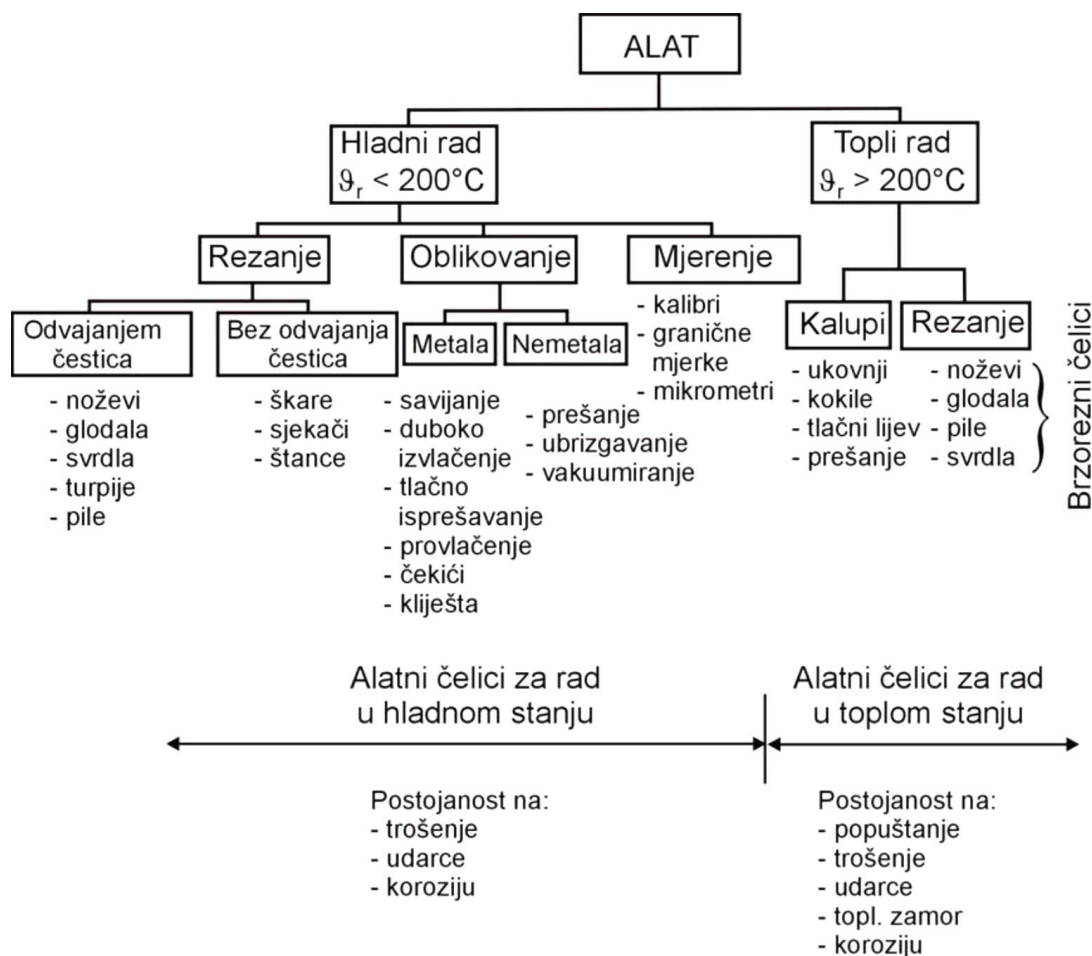
Snop elektrona koji padnu na kristalnu tvar pri elektronskoj mikroskopiji će se otkloniti prema istim geometrijskim zakonima koji vrijede za rendgensko zračenje. Prednosti primjene elektronskog mikroskopa u odnosu na svjetlosni mikroskop proizlaze iz vrlo male valne duljine elektrona (oko 0,004 nm) čime se postiže veliko razlučivanje od svega nekoliko desetina nanometara, što odgovara veličini parametara kristalnih rešetki metala. Usporedbom

s apsorpcijom vidljivog svjetla udio raspršenih elektrona kod metala je malen čime je moguće „prosvjetljivanje“ metala.

3. ALATNI ČELICI[2]

Upotreba alata je povezana sa samim počecima ljudske civilizacije te su prvi korišteni alati bili kamena sjekira, kameni nož te svi ostali predmeti koje je čovjek koristio u svakodnevnom životu. Prije 5.000 godina započinje upotreba alata izrađenih od meteoritskog željeza, a nešto kasnije počinje upotreba vatre kao sredstva za pougljičavanje željeza čime nastaju prvi alati od čelika. Alat u pogledu industrijske sociologije predstavlja svako sredstvo kojim čovjek olakšava ili omogućava izvršenje željene radnje bilo neposredno, snagom ruke ili posredno snagom nekog stroja.

Shematski prikaz [Slika 2] predstavlja podjelu alata i alatnih čelika kao i najvažniji zahtjevi koje alatni čelici moraju zadovoljiti.



Slika 2. Shematski prikaz podjele alatnih čelika.

Osnovna svojstva koja alatni čelici moraju posjedovati su:

- otpornost na trošenje
- žilavost (visoka udarna radnja loma).

Stručna literatura često navodi i otpornost na popuštanje kao osnovno svojstvo, ali prema nekim autorima to ipak pripada posebnim zahtjevima prema alatnim čelicima za rad pri povišenim temperaturama ($>200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Proizvodni (ekonomski) zahtjevi i svojstva prema alatnim čelicima su:

- mogućnost obrade alata odvajanjem čestica,
- visoka zakaljivost,
- visoka prokaljivost,
- zanemariva sklonost pogrubljenju zrna prilikom austenitizacije,
- neznatna promjena dimenzija tijekom rada,
- sigurnost s obzirom na pojavu pukotina i lomova tijekom toplinske obradbe,
- neznatna sklonost razugljičenju tijekom toplinske obradbe,
- otpornost na koroziju,
- mogućnost poliranja,
- ekonomičnost.

Alatni čelici se primjenjuju u toplinski obrađenom stanju (kaljenje i popuštanje), dok se dodatno mogu provesti neki od postupaka oplemenjivanja površine. Poboljšavanje svojstava alata površinskim toplinskim obradbama uglavnom se provodi slijedećim postupcima:

- površinsko kaljenje (plameno, indukcijsko, lasersko, elektronskim snopom, impulsno),
- termo-kemijski postupci (cementacija, nitriranje, karbonitriranje, boriranje, oksidacija, difuzija metalnih elemenata – V, Cr, Al, Si),
- tvrdo elektrokemijsko kromiranje,
- nanošenje karbida, nitrida, karbonitrida i oksida iz parne faze (CVD i PVD postupci),
- nanošenje dijamantnih slojeva (DLC – Diamond Like Carbon).

Zbog traženih svojstava i potrebe zakaljivanja i prokaljivanja alatni čelici u pravilu imaju viši udio ugljika ($>0,6\%$) nego konstrukcijski čelici. Uglavnom se isporučuju u toplovaljanom, hladnovučenom, kovanom ili lijevanom stanju u obliku šipki, traka ili ploča.

S obzirom na kemijski sastav alatni čelici mogu biti:

- nelegirani,
- niskolegirani,
- visokolegirani.

Prema radnoj temperaturi i uvjetima primjene alatni čelici se dijele na:

- a) alatne čelike za hladni rad ($<200\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- b) alatne čelike za topli rad ($>200^{\circ}\text{C}$),
- c) brzorezni čelici.

3.1. Visoko-legirani alatni čelici za hladni rad

Glavni legirajući element ove skupine čelike je krom ($>5\%$) uz moguće dodatno legiranje vanadijem, molibdenom i/ili volframom. Krom pritom može djelovati na nastanak karbida $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$, Cr_7C_3 s približno 91% kroma ili Cr_{23}C_6 s približno 94% kroma tj. porast otpornosti na trošenje, povišenje temperature austenitizacije i otpornosti na koroziju (što je manji udio ugljika više će se kroma otopiti u austenitu).

Povišenjem stupnja legiranosti i temperature austenitizacije raste udio zaostalog austenita u zakaljenoj mikrostrukturi što može smanjiti pojavu deformacija nakon kaljenja. S obzirom na kemijski sastav, mikro-strukturu i svojstva visoko-legirani alatni čelici za hladni rad mogu se podijeliti u tri podgrupe:

- a) čelici s $\sim 5\%$ kroma (npr. X100CrMoV5-1),
- b) visoko-ugljični ledeburitni čelici s 12% kroma (X210Cr12, X210CrW12, X65CrMoV12, X55CrVMo12-1),
- c) martenzitni nehrđajući čelici (npr. X42Cr13, X45CrMoV15, X5CrMo14, X1CrMoV18).

3.1.1. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici su legure temeljene na trojnom sustavu Fe-Cr-C. Maseni udio kroma obično je između 12 i 18 %, a ugljika od 0,15 do 1,2 %. Martenzitna mikro-struktura ovih čelika (bct rešetka) postiže se alotropskom transformacijom austenita tako što se dovoljno brzim hlađenjem austenita na temperaturi MS počinje, a na temperaturi MF završava transformacija austenita u martenzit dok brzina hlađenja ne mora biti velika. Martenzitni čelici su zbog visokog udjela legirnih elemenata kaljivi na zraku. Čelici koji posjeduju veći udio ugljika uz martenzit mogu sadržavati i određenu količinu karbida u mikrostrukтури, to su u pravilu alatni čelici kod kojih je primarna otpornost na abrazijsko trošenje. Međutim, konstrukcijski martenzitni nehrđajući čelici sadrže manje ugljika i kod njih je u prvom planu korozijska otpornost.

Martenzitni nehrđajući čelici imaju široki raspon vrijednosti za čvrstoću i granicu razvlačenja, feromagnetični su dok je visoka tvrdoća ipak njihovo glavno svojstvo što je temelj za dobru otpornost na abrazijsko trošenje. Martenzitni čelici nemaju dobru korozijsku postojanost kao drugi nehrđajući čelici, a uzrok tome je nešto niži sadržaj kroma i viši sadržaj ugljika nego kod drugih čelika. Radi toga se primjenjuju u uvjetima kad se od materijala traži visoka čvrstoća i tvrdoća uz blaže zahtjeve glede korozijske postojanosti. Zbog nižeg sadržaja kroma i drugih legirnih elemenata jeftiniji su od drugih nehrđajućih čelika. Primjenjuju se za lopatice parnih, plinskih i mlaznih turbina na relativno niskim radnim temperaturama, za parne cjevovode, vodne turbine, brane u kanalima sa slatkom vodom, cijevi i ventile u rafinerijama nafte, obloge valjaka za kontinuirano lijevanje i dr.

Nisko-ugljični supermartenzitni čelici koriste se za naftovode i plinovode. Čelici s višim udjelom kroma i ugljika koriste se za kirurške instrumente, pribor za jelo, zupčanike i osovine. Ne koriste se na temperaturama višim od 650°C zbog pada mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

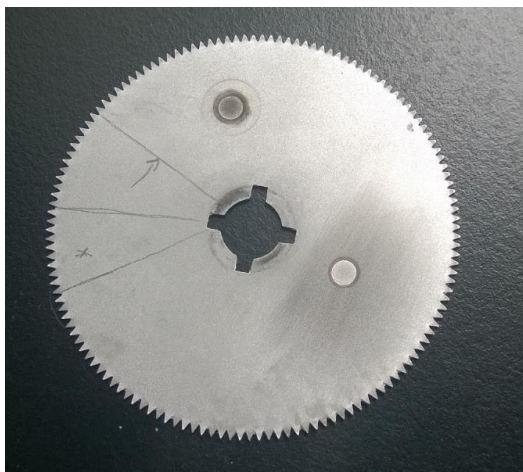
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Cilj ovoga rada je karakterizacija materijala koji se koriste za izradu lista kružne pile za skidanje gipsa u medicini s ciljem pronalaženja uzroka njegovog preranog dotrajanja. U tu svrhu određen je sastav materijala kružne pile, određena je kvantitativna i kvalitativna analiza strukture te je izmjerena mikro-tvrdoća i makro-tvrdoća materijala.

Nakon provedene analize obrađeni rezultati su sumirani te su postavljeni određeni zaključci o strukturi i tvrdoći lista kružne pile koja se upotrebljava u medicini za skidanje gipsa.

4.2. Materijal za ispitivanje

Na slici 3. prikazana je kružna pila na kojoj je provedena karakterizacija materijala. Kemijski sastav materijala od kojeg je napravljena kružna pila nije poznat, isto kao i mikrostruktura materijala. Na površini pile vide se tragovi ostali nakon određivanja kemijskog sastava materijala. Također se vide linije po kojima su izrezani uzorci za metalografsko ispitivanje.



Slika 3. List kružne pile.

4.3. Kemijska analiza materijala

Ispitivanje kemijskog sastava materijala lista kružne pile provedeno je u Laboratoriju za analizu materijala u Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Za to je

korištena metoda optičke emisijske spektroskopije s tinjajućim izbojem (GD-OES – Glow Discharge Optical Emission Spectrometry), na uređaju Leco GDS 850A, prikazanom na slici 4. Uređaj je namijenjen za kvantitativnu i kvalitativnu kemijsku analizu vodljivih čvrstih uzoraka. Da bi se obavila analiza, potrebno je pobuditi atome a to se može postići na više načina: plamenom, električnom plazmom i električnim izbojem. U zadnje vrijeme u formi luka i iskre kao i najnovije tinjajućim izbojem tj. plazmom (ioniziranim plemenitim plinom – argonom).



Slika 4. Instrument Leco GDS 850A.

Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 1. Navedene su srednje vrijednosti od tri mjerenja.

Tablica 1. Rezultati kemijske analize

| Oznaka elementa | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | N | Cu | Al | V | Nb | Fe |
|-----------------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Maseni udio % | 0,125 | 0,99 | 0,99 | 13,5 | 6,06 | 0,47 | 0,16 | 0,101 | 0,117 | 0,085 | 0,024 | ostatak |

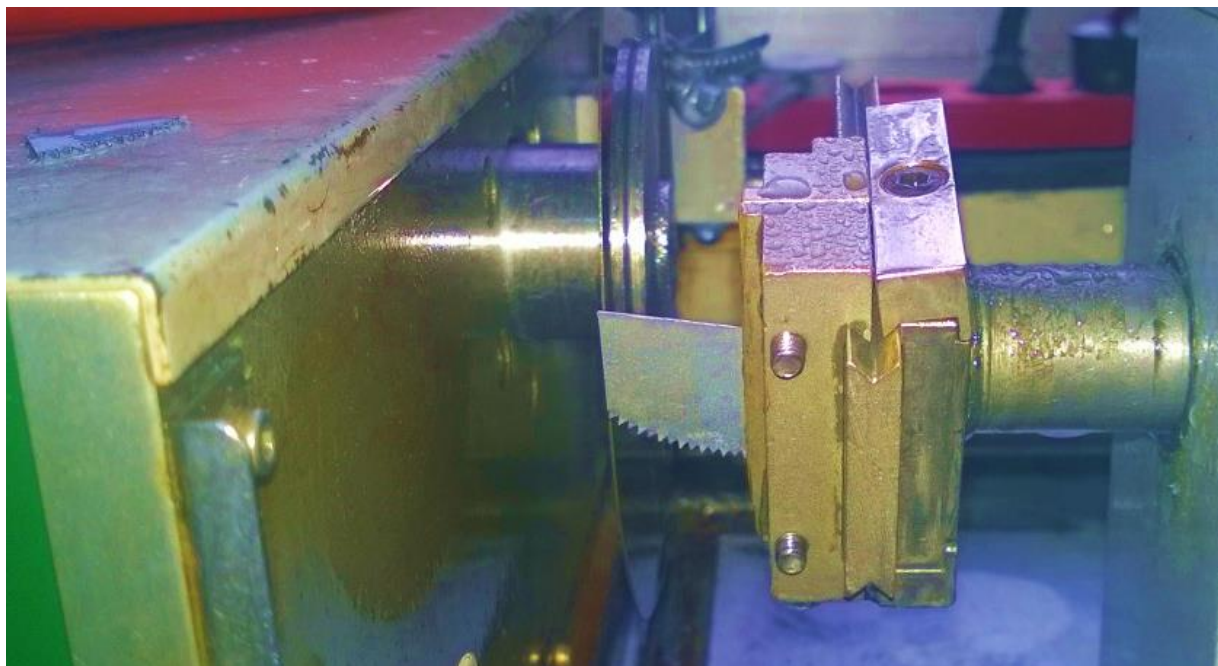
4.4. Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu

4.4.1. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture

Nakon što je određen kemijski sastav materijala lista kružne pile pristupilo se analizi njegove mikrostrukture. Priprema uzoraka kao i samo ispitivanje provedeno je u laboratoriju za metalografiju Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje je provedeno na uzorcima korištenog lista kružne pile za skidanje gipsa. Za ispitivanje je pripremljen uzorak navedenog materijala, tako da su iz lista kružne pile izrezana 2 dijela, koja su zatim kapsulirana u polimernu masu, brušena i polirana, te nakon analize u poliranom stanju nagrizana. Na slici 3 naznačene su linije po kojima treba izrezati uzorke za daljnju analizu.

4.4.1.1. Izrezivanje

Izrezivanje uzoraka za ispitivanje izvedeno je na mikrorezalici s abrazivnim diskom „Accutom-2“ proizvođača „Struers“, uz konstantno hlađenje vodom kako bi se izbjegao utjecaj topline na mikrostrukturu materijala koji se priprema za analizu. Na slici 5 prikazan je postupak izrezivanja uzorka na mikro-rezalici.



Slika 5. Prikaz postupka izrezivanja dijela uzorka pile.

4.4.1.2. Ulijevanje (kapsuliranje)

Ulijevanje u kalupe izvodi se radi zaštite uzorka i olakšanog rukovanja s uzorkom pri sljedećim fazama pripreme i pri samom ispitivanju.

Kapsuliranje se izvodi na pneumatskoj preši Pneumet Press proizvođača Buehler na način da se uzorci stavljaju na čelo klipa preše koji se zatim spusta u kalup koji se puni polimernim prahom, zatim se kalup zatvara, polimerni prah se preša i na kalup se postavlja grijač. Uslijed visokog tlaka i temperature polimerni prah prelazi u prozirnu polimernu masu u kojoj metalni uzorci ostaju zarobljeni, što omogućava lakše rukovanje uzorcima tijekom daljnje pripreme i analize.

Sinteriranje traje 15 min na temperaturi 143°C nakon čega slijedi hlađenje i vađenje iz kalupa.

Na slici 6 prikazani su izrezani uzorci na preši, prije kapsuliranja.

Uzorak na kojem je analiziran poprečni presjek postavljen je u držač (oprugu) koji ga drži u željenom položaju, u kojem će ostati i nakon što se kapsulirani uzorak izvadi iz preše.



Slika 6. Prikaz uzoraka na preši prije kapsuliranja

Na slici 7 prikazan je uređaj za kapsuliranje uzoraka .



Slika 7. Prikaz uređaja za kapsuliranje.

4.4.1.3. Brušenje

Postupak brušenja se odvija na uređaju prikazanom na slici 8. Postupak se odvija na način da se prvo brusni papir namoči u vodu tako da može prianjati na rotacionu plohu na kojoj će se vršiti brušenje uzoraka. Brušenje je provedeno brusnim papirom s abrazivnim česticama od silicijevog karbida. Prvi papir koji se koristi ima oznaku P 320. Prilikom brušenja uzorak se kontinuirano hladi vodom kako se ne bi povisila temperatura uzorka i time utjecalo na mikrostrukturu.

U procesu brušenja potrebno je paziti da se površina uzorka ravnomjerno pobrusi. Nakon svakog koraka brušenja uzorak se zakreće za 90° i brusi dok se ne otklone tragovi prethodnog koraka. Također se uzorak mora isprati vodom kako ne bi ostale na površini odvojene čestice od brušenja.

Nakon brusnog papira s oznakom P320 korišteni su brusni papiri oznake P500, P1000, P2000 i brusni papir P4000 kojim postizemo zadovoljavajuću kvalitetu brušene površine. Kod posljednjeg brusnog papira s oznakom P4000, abrazivne čestice su od aluminijevog oksida. Brušenje je provedeno na uređaju Buehler: Phoenix Alpha uz brzinu vrtnje od 300 o/min.

4.4.1.4. Poliranje

Poliranje je provedeno na uređaju za poliranje „Struers“ DAP-V. Uzorak se štiti od povišenja temperature prilikom poliranja upotrebom lubikanta. Postupak poliranja uzorka proveden je u 2 koraka. U prvom koraku korištena je dijamantna pasta promjera abrazivnih čestica 3 μm na tkanini oznake DAC, dok je u drugom koraku korištena dijamantna pasta promjera abrazivnih čestica 1 μm na tkanini oznake NAP. Postupak poliranja se vrši u trajanju od po 5 minuta nakon čega se uzorci ispiru u vodi. Ispiranjem se skida višak sredstva za poliranje i abrazivne čestice materijala uzorka i mase u koju je uzorak zaliven. Potom se uzorak ispiru u etilnom alkoholu da bi se površina očistila od masnoće i brže osušila.



Slika 8. Prikaz uređaja za poliranje.

4.4.1.5. Nagrizanje

S obzirom na rezultate kemijske analize iz kojih je određen sastav ispitivanog materijala određeno je i sredstvo za nagrizanje. U tu svrhu koristili smo *Adlerov reagens* čiji su sastojci i koncentracije prikazane u tablici 2.

Tablica 2. Prikaz sastava *Adlerovog reagensa*^[3]

| SASTAV | KONCENTRACIJA |
|-------------------------------|---------------|
| Bakrov amonijev klorid | 9 g |
| Klorovodična kiselina | 150 ml |
| Hidratizirani željezov klorid | 45 g |
| Voda | 75 ml |

4.4.2. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je na uređaju OLYMPUS GX51, prikazanom na slici 9. Mikrostruktura je analizirana u poliranom i nagriženom stanju.



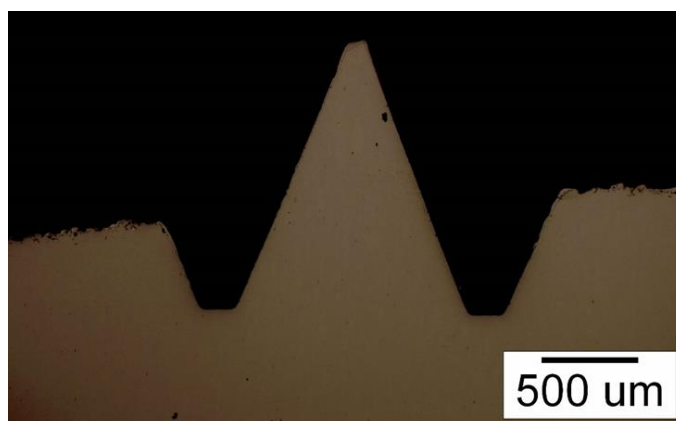
Slika 9. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51.

4.4.2.1. Mikrostruktura u poliranom stanju

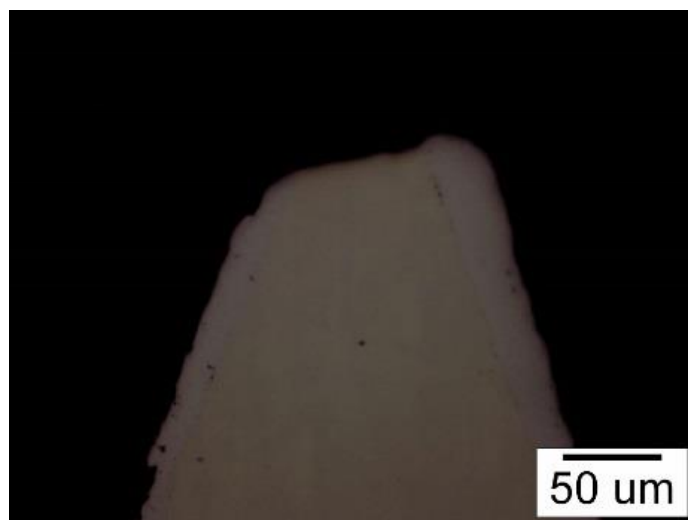
Površina uzoraka kvalitetno je ispolirana, nakon čega je ista promatrana na svjetlosnom mikroskopu. Na uzorcima nisu uočene nikakve nepravilnosti mikrostrukture. Na vrhovima zuba vidljivi su mali znakovi trošenja.

Na slikama 10 do 13 prikazane su površine nakon poliranja uzoraka.

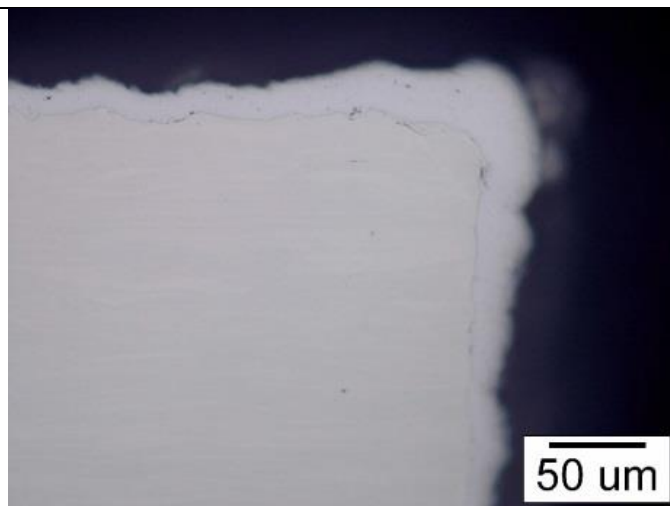
Na slici 10 prikazan je izgled bočne površine uzorka kružne pile u području rezanja, a na slici 11 detaljniji prikaz vrha zuba. Na slici 12 prikazana je površina poprečnog presjeka istrošene pile na kojoj se vidi rub rezne oštrice zuba. Na slici 13 vidi se poprečni presjek pile izvan reznog područja, bliže središtu lista.



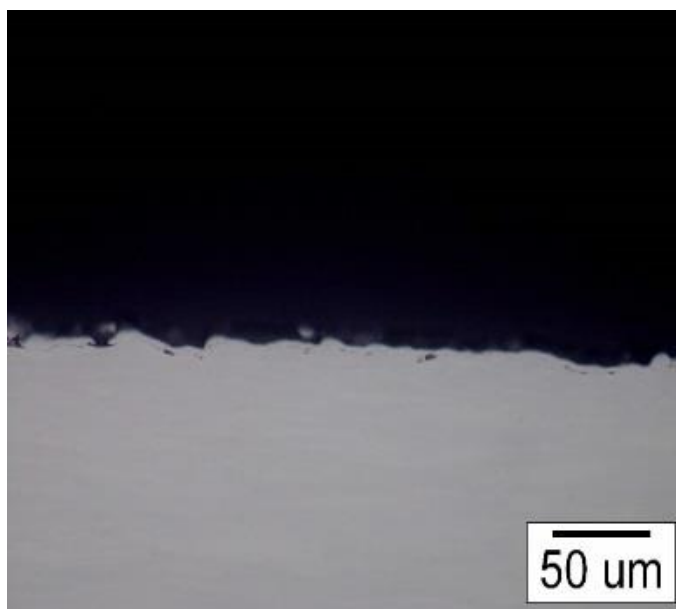
Slika 10. Polirana površina uzorka u području zuba pile.



Slika 11. Detaljniji prikaz bočnog presjeka vrha zuba u poliranom stanju.



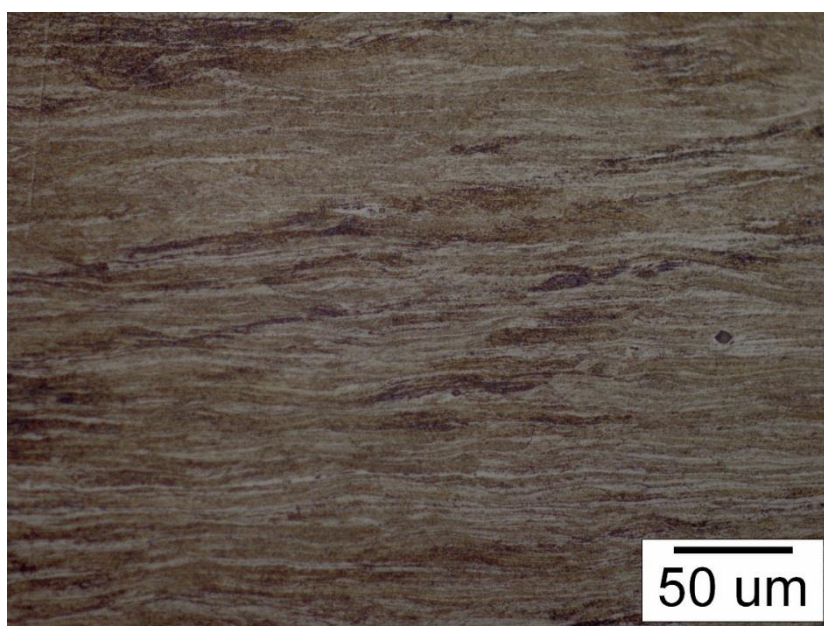
Slika 12. Prikaz poprečnog presjeka pile u reznom području



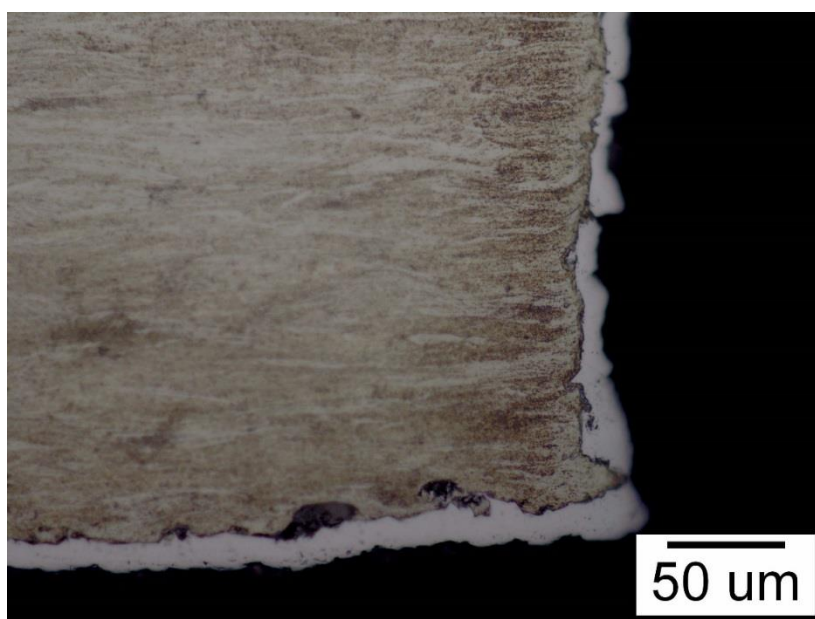
Slika 13 Prikaz poprečnog presjeka pile (udaljeno od reznog područja)

4.4.2.2. Mikrostruktura u nagriženom stanju

Nakon poliranja uzorci su nagriženi u *Adlerovom reagensu*. Nakon nagrizanja na površini zuba jasno se mogla vidjeti prevlaka od drugog materijala. Prevlaka je najdeblja na vrhovima zubi i iznosi oko 18 μm . Prevlaka se stanjuje prema središtu lista pile. Na slici 13. i 14. prikazana je površina uzoraka nakon nagrizanja. Slika broj 13. prikazuje mikrostrukturu u poprečnom presjeku, a na slici 14 vidi se prevlaka na površini zuba.



Slika 14. Prikaz mikrostrukture u poprečnom presjeku nakon nagrizanja.



Slika 15. Prikaz mikrostrukture u reznom području nakon nagrizanja.

4.4.2.3. Mjerenje mikrotvrdoće

Nakon mikroskopske analize mikrostrukture, gdje je ustanovljeno kako se na površini uzorka nalazi neka vrsta prevlake, određena je mikrotvrdoća osnovnog materijala i materijala površinske prevlake kako bi se utvrdilo o kakvoj se prevlaci radi.

Mikrotvrdoća pripremljenih uzoraka mjerena je metodom po Vickersu na uređaju WILSON-WOLPERT TUKON 2100 B proizvođača INSTRON, koji je prikazan na slici 15. Izvršena su mjerenja s opterećenjem od 0,98 N (HV 0,1) i 0,49 N (HV 0,05). Penetrator je istostrana, četverostrana dijamantna piramida s kutom među stranicama 136 stupnjeva. Mikrotvrdoća je mjerena na osnovnom materijalu i na metalnoj prevlaci na površini zuba pile.



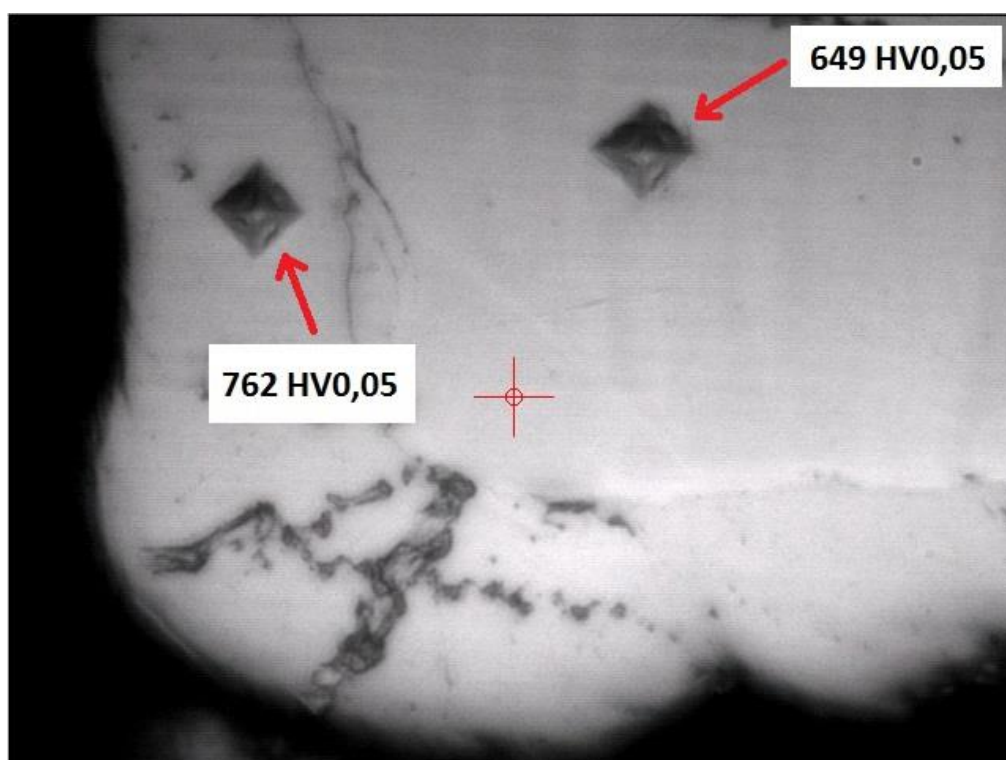
Slika 16. Mikrotvrdomjer WILSON-WOLPERT TUKON 2100 B proizvođača INSTRON.

Slike 17. i 18. prikazuju mjesta na kojima su izvršena mjerenja tvrdoće i rezultate mjerenja.

U tablici 3 prikazani su rezultati mjerenja mikrotvrdoće. Na prevlaci je izmjerena samo HV 0,05, a na osnovnom materijalu HV 0,05 i HV 0,1. Prikazane vrijednosti u tablici su srednje vrijednosti od 3 mjerenja.



Slika 17. Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala (HV 0,1).



Slika 18. Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala i površinskog sloja (HV 0,05).

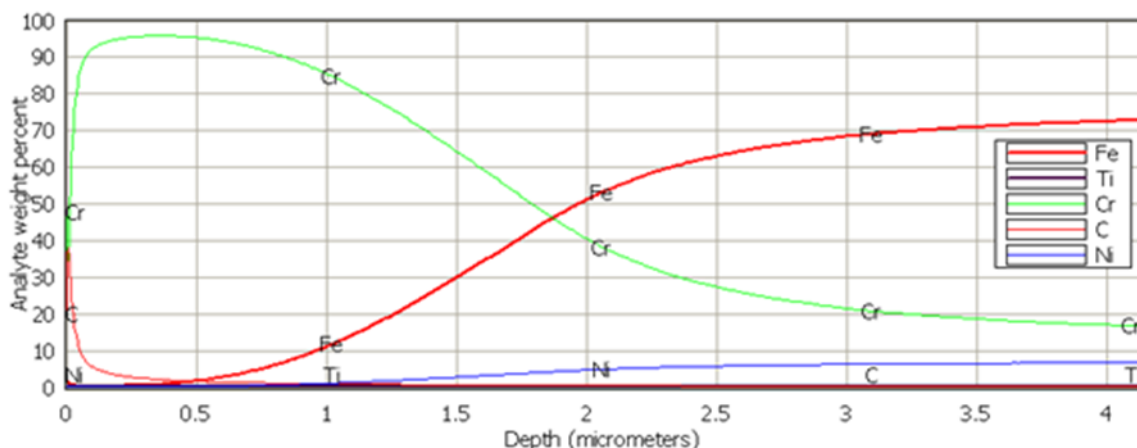
Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće.

| | HV 0,1 | HV 0,05 |
|-------------------|--------|---------|
| Osnovni materijal | 635 | 649 |
| Površinski sloj | - | 762 |

Iz dobivenih rezultata vidljiva je razlika u tvrdoći osnovnog materijala i tvrdoći površinskog sloja.

4.5. GDOES analiza površinske prevlake

Kako bi se otkrio sastav površinske prevlake provedena je analiza kemijskog sastava materijala u ovisnosti o udaljenosti od površine. Za to je korištena kvantitativna dubinska profilna analiza optičkom emisijskom spektroskopijom s tinjajućim izbojem (GDOES – Glow Discharge Optical Emission Spectrometry) na uređaju GDS 850, Leco. Uređaj je prikazan na slici 4, a na slici 18 prikazani su rezultati kvantitativne dubinske profilne analize. Prema dobivenim rezultatima, s velikom vjerojatnošću može se zaključiti da se radi o prevlaci dobivenoj postupkom tvrdog kromiranja.



Slika 19. Maseni udjeli željeza, kroma, ugljika i ostalih elemenata od površine do dubine od 4 μm .

5. ANALIZA REZULTATA

5.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava

Rezultati kemijske analize pokazuju da se radi o nehrđajućem čeliku s 13,5% Cr, 6% Ni i 0,125% C. Osim navedenog, čelik sadrži i manje količine ostalih legiranih elemenata poput silicija, mangana, molibdena, bakra, aluminijsa, vanadijsa i niobija. S obzirom da se među njima nalaze tvorci precipitata, s velikom vjerojatnošću može se ustvrditi da se radi o precipitacijski očvršnutom martenzitnom nehrđajućem čeliku PH 15-5.

5.2. Osvrt na rezultate analize mikrostrukture

Izvršenom analizom mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu, te uz rezultate kemijske analize potvrđeno je da se radi o martenzitnom precipitacijski očvršnutom nehrđajućem čeliku PH 15-5. Na površini reznog dijela pile nalazi se prevlaka bogata kromom, jasno vidljiva na slikama 11 i 12 u poliranom stanju, te na slici 14 u nagrizenom stanju. U mikrostrukтури materijala nisu uočene nikakve nepravilnosti koje bi upućivale na razlog preuranjenog zatupljenja zubi pile.

5.3. Osvrt na rezultate analize mikrotvrdoće

Mikrotvrdoća materijala izmjerena je u osnovnom materijalu u oba presjeka te na prevlaci. Na osnovnom materijalu izmjerena je mikrotvrdoća HV0,05 i HV0,1, a na prevlaci (zbog male debljine prevlake) samo mikrotvrdoća HV0,05.

Mikrotvrdoća osnovnog materijala iznosi 649 HV0,05 što odgovara mikrotvrdoći martenzita. Mikrotvrdoća prevlake je 762 HV0,05 što je za znatno više od mikrotvrdoće osnovnog materijala.

5.4. Osvrt na rezultate GD-OES analize

Za otkrivanje vrste površinske prevlake na zubima alizirane pile korištena je GD-OES analiza, dubinska profilna analiza kojom je moguće otkriti točan kemijski sastav i dubinu prevlake. Provedenom analizom utvrđeno je da se u površinskom sloju nalazi visoka koncentracija kroma kao što je to prikazano na slici 18, te je zaključeno da se radi o tvrdo kromiranom sloju na površini osnovnog materijala pile. Tvrdo kromiranje je postupak kojim se pomoću

elektrolize na bazni materijal nanosi sloj kroma u svrhu poboljšanja svojstava baznog materijala zbog visoke tvrdoće, otpornosti na habanje i koroziju te smanjenja trenja.

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- kemijskom analizom utvrđeno je da je materijal od kojeg je izrađena pila nehrđajući čelik s 13,5% Cr, 6% Ni i 0,125% C. Sadržaj kemijskih elementa koji su jaki tvorci precipitata ukazuje na činjenicu da se radi o martenzitnom precipitacijski očvrnutom nehrđajućem čeliku PH 15-5;
- mikrostrukturna analiza potvrdila je da se radi o martenzitnom precipitacijski očvrnutom nehrđajućem čeliku;
- na reznj površini pile identificirana je prevlaka. Prolaka je najdeblja na zubima, oko 18 μm , a stanjuje se prema središtu pile.
- GD-OES analizom utvrđeno je da je prevlaka kromirani sloj nanesen s ciljem produljenja radnog vijeka pile;
- mikrotvrdoća osnovnog materijala iznosi 649 HV 0,05 i odgovara tvrdoći martenzita, a tvrdo kromirani sloj ima tvrdoću 763 HV 0,05.

Tijekom provedenog istraživanja u materijalu nisu pronađene nikakve greške koje bi ukazivale na razloge preuranjenog dotrajanja lista kružne pile. Uočeni su tek manji znakovi istrošenosti, no nažalost, točni podatci o eksploataciji, kao ni uzorak nove pile za usporedbu istrošenosti, nisu bili dostupni.

LITERATURA

- [1] Robert W. Cahn and Peter Haasen, Physical metallurgy, Volumen 2, Fourth, revised and enhanced edition, Elsevier Science B.V., 1996.
- [2] Svojstva i primjena materijala, T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, FSB, Zagreb, 2007.
- [3] <http://www.metallographic.com/Technical/Basics.pdf>
- [4] R. Wiesendanger: Scanning probe microscopy and spectroscopy (Methods and applications), Cambridge University Press, 1994.
- [5] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Metalografija>

PRILOZI

I. CD-R disc